

乌鲁木齐市土地生态安全综合评价

王一山^{1,2}, 张 飞^{1,2,3}, 陈 瑞^{1,2}, 齐亚霄^{1,2}, 刘长江^{1,2}

(1. 新疆大学资源与环境科学学院智慧城市与环境建模普通高校重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046; 3. 中亚地理信息开发利用国家测绘地理信息局工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要: 土地生态环境是人类生产生活的重要场所,其安全状况与人类社会的可持续发展息息相关。通过选取干旱区城市乌鲁木齐市为研究对象,针对乌鲁木齐市2017年土地生态环境现状,应用生态系统服务价值(ESV)评估、景观生态安全指数(LES)、压力-状态-响应(PSR)模型共同构建乌鲁木齐市土地生态安全评价体系。结果表明:(1) 2017年乌鲁木齐市ESV为 220.70×10^8 元,97.48%的区域为中低ESV区域,ESV最重要的贡献来源是林草地,最主要的贡献区域是乌鲁木齐县和达坂城区,不同区域ESV差异明显。(2) 乌鲁木齐市具备典型的干旱区城市景观特征,景观整体分布相对协调,但具备生态优势的景观分布还较少。景观生态安全(LES)指数从空间上表现为“西低东高”,且总体水平偏低,同时各区域的LES指数还有一定的分类组团特征,高值区域集中在达坂城区、乌鲁木齐县、米东区等边缘区域,中心城区的LES指数普遍较差,受人类活动影响深刻。(3) 乌鲁木齐市各区域土地生态安全主要分布在敏感级和相对安全级之间,整体处于中等水平,边缘区域普遍高于中心区域,边缘区域中乌鲁木齐县的土地生态安全水平最高,中心区域中高新区土地生态安全水平最高。随着城市扩张和人口增长,土地侵占、资源消耗等矛盾加剧,部分区域的土地生态安全已经受到一定程度的破坏,能够维持现有水平,主要凭借乌鲁木齐市各区域的自然本底(状态),人类活动的恶劣影响(压力)和积极改善作用(响应)尚不明显。

关键词: 压力-状态-响应(PSR)模型; 生态系统服务价值; 景观生态安全; 土地生态安全评价; 乌鲁木齐
文章编号:

随着经济迅速发展、人口急速增长和城市急剧扩张,人地矛盾激化,生态空间不断被挤压、生态环境恶化、生态功能遭到破坏等生态安全问题日益突出,使得保障生态安全成为人类社会可持续发展亟待解决的难题^[1]。尤其是中共十九大以来,习近平总书记提出:“加强生态文明体制改革,建设美丽中国。”生态文明建设成为热点话题,生态安全领域的研究呈现出蓬勃发展态势,取得了许多重要研究成果^[2-3]。

土地生态安全评价是一种土地生态环境可持续发展程度的综合评价,主要用于评估人类活动对土地生态环境的影响及土地生态环境保障人类正

常生产生活的最低底线,并对土地生态环境功能结构健康状况进行判断^[4-5]。目前,有关于土地生态安全评价的研究主要集中在城市土地生态安全评价^[6]、耕地生态安全评价^[7]、湿地生态安全评价^[8]、流域生态安全评价^[9]等方面,研究尺度则涵盖城市群^[10]、省^[11]、市^[12]、县^[13]、乡镇^[14]等区域范围,研究内容不再局限于简单的自然环境评价而转为考虑经济、社会、生态的总体评价,研究方法应用比较广泛的主要有压力-状态-响应(Pressure-state-response, PSR)模型^[15]、综合指数法^[16]、生态足迹法^[17]和景观生态安全评价法^[18]等,内容主要涉及指标选取、评价指标体系构建、分等定级及阈值确定等方面,由于指

收稿日期: 2020-01-05; 修订日期: 2020-07-06

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20040400)资助

作者简介: 王一山(1995-),男,硕士研究生,研究方向为城市生态环境遥感研究。E-mail: wangyishan639@163.com

通讯作者: 张飞(1980-),男,博士,教授,研究方向为城市生态环境遥感研究。E-mail: zhangfei3s@163.com

标选取和方法不一,还难以形成统一的评价标准。PSR模型是由联合国粮农组织于1995年联合多方制定的土地质量评价标准,其框架内包含压力、状态、响应3个模块,分别对应人类活动对环境胁迫作用、环境自然禀赋、人类改造环境以适宜人类生活发展的措施,是一种较为科学全面的评价方法,该模型能够很好地结合自然、资源、社会、经济、人文等诸多因素构建评价体系,同时综合反映自然、社会和经济因子之间的因果关系,具有较强的针对性和科学性,因此在生态安全评价领域应用较为常见。但基于PSR框架的生态安全评价体系往往侧重社会经济指标而忽视土地生态安全的空间异质,难以全面表征土地生态安全状况^[19]。鉴于此,本文借助熵权法引入景观生态安全指数(Landscape ecological security index, LES)和生态系统服务价值(Ecosystem service value, ESV)参与PSR模型评价体系,全面表征区域生态环境现状及潜力。

乌鲁木齐市是典型的西北干旱区城市,该区域人地矛盾尖锐、生态环境恶劣,生态系统十分敏感脆弱,严峻的生态环境问题成为制约该地区经济发展的重要因素之一。制定科学适宜的土地生态安全评价体系对维护该地区生态环境安全,城市土地可持续利用具有显著现实意义。但近年来,有关乌鲁木齐市土地生态安全评价的研究往往侧重社会经济因素影响而忽视其自然地理特征和空间分异规律^[20],不能够全面客观的反映乌鲁木齐市土地生态安全真实面貌。因此,本文以乌鲁木齐市为研究对象,通过构建乌鲁木齐市综合生态安全评价体系,为该区域后期的生态网络建设和生态环境治理提供依据和参考。

1 研究区概况

乌鲁木齐市位于亚欧大陆腹地新疆中北部,南倚北天山北坡,北临准噶尔盆地南缘,平均高程800 m,地理范围介于86°37'33"~88°58'24"E,42°45'32"~44°00'00"N之间。区域三面环山,地势南高北低,于北部形成喇叭口状的冲击平原。该区域属中温带半干旱大陆性气候,全年盛行东北风和西南风,昼夜温差大,寒暑变化剧烈,年均气温6.4℃,年均降水量280 mm,年均蒸发量2730 mm,是典型的西北干旱区特大绿洲城市。乌鲁木齐市是“一带一路”战略重要节点城市,是全疆政治、经济、教育、文化

中心,辖管7区1县,2017年辖区总面积约 1.38×10^4 km²,总人口约 350.4×10^4 人。因其具有明晰的自然地理特征,和极为重要的战略地位,确定该区域生态安全分布状况对于保障该区域人与自然协调可持续发展具有显著的现实意义。

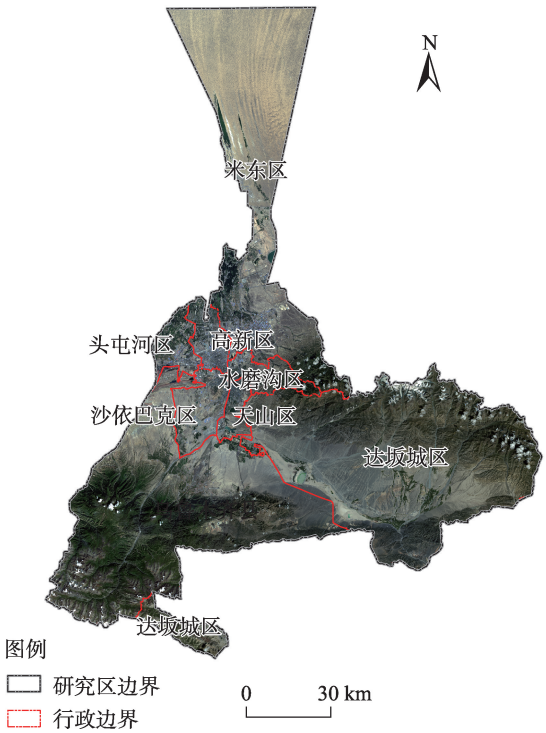


图1 研究区示意图

Fig. 1 Sketch map of the study area

2 数据资料与研究方法

2.1 数据来源与处理

2.1.1 数据来源说明 本文中采用基础数据包括土地利用/覆被数据、DEM数据、植被覆盖数据、矢量数据等,相关数据的来源、说明、用途详见表1。同时以土地利用数据为基础,为统一精度,综合考虑基础数据特点和可计算性,将所有数据进行100 m×100 m重采样。

2.1.2 评价指标标准化处理及权重确定 熵权法是一种通过比较指标间信息差异来对指标赋权的客观赋权方法,因其能够有效避免在求解权重时人为因素的干扰,在多指标评价体系中得到了广泛应用^[21]。本文亦采取熵权法求解指标权重,使ESV和LES指数的引入更为贴近实际。具体处理流程如下:

表1 数据类型及来源

Tab. 1 Types and sources of data

数据类型	时间	数据精度	数据来源	用途
土地利用类型	2017年7月	30 m×30 m	Landsat 8 OLI影像;地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)和 Google Earth 影像的人工目视解译成果	生态系统服务价值(ESV)、景观格局分析基础数据
数字高程数据	2017年	30 m×30 m	地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)	高程、坡度计算
中国年度植被覆盖数据	2017年	250 m×250 m	中国科学院资源环境科学数据中心	评价指标核算
气象数据	2017年	-	中国气象科学数据共享服务网中国地面气候资料数据集(包含降雨量、气温、蒸散发等)来源于中国气象科学数据共享服务网(http://data.cma.cn/)	评价指标核算
土壤数据	第二次全国土地调查	1:1000000	全球土壤属性数据库中的中国土壤数据集来源于“黑河计划数据管理中心”(http://westdc.westgis.ac.cn)	评价指标核算
水系、交通路网数据	2017年7月	-	公开街道地图(https://www.openstreetmap.org)	评价指标核算
人口、经济等数据	2017年	-	《2017年乌鲁木齐市统计年鉴》	评价指标核算

(1) 极差标准化

本文的评价指标既有正向指标又有逆向指标,不同的方向指标具有不同的标准化处理方法。本文采用极差归一化法对指标给予标准化处理,其公式为:

正向指标: $Y_{ij} = (1 - a) + a \times \frac{X_{ij} - X_{\min j}}{X_{\max j} - X_{\min j}}$ (1)

逆向指标: $Y_{ij} = (1 - a) + a \times \frac{X_{\max j} - X_{ij}}{X_{\max j} - X_{\min j}}$ (2)

式中: Y_{ij} 为标准化后的值; X_{ij} 为第*i*年第*j*项指标原始值; $X_{\max j}$ 和 $X_{\min j}$ 分别为相应指标的最大值和最小值,为避免0值,参考前人研究^[22]设置修正值a, a取0.9。

(2) 计算第*j*个指标的信息熵:

$E_j = -\ln(n)^{-1} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij}$ (3)

其中 $P_{ij} = Y_{ij} / \sum_{i=1}^n Y_{ij}$, 因之前进行过修正,所以无0值。

(3) 计算第*j*个指标的权重:

$W_j = \frac{1 - E_j}{k - \sum E_j} \quad (j=0, 1, 2, 3, \dots, k)$ (4)

(4) 最终依据权重确定综合得分:

$Z = \sum_{i=1}^k X_{ij} \cdot W_j$ (5)

2.2 研究方法

2.2.1 生态系统服务价值(ESV)评估
ESV是指人类对于生态系统服务功能赋予价值属性并进行量

化与评价的过程,能够客观地反映区域生态系统的直接经济价值、间接经济价值和生态环境服务价值^[23-24]。明确区域不同类型生态系统分布状况及在城市可持续发展中的功能和价值。ESV具体计算如下:

$ESV_T = \sum (A_i \times VC_i)$ (6)

式中: ESV_T 为*T*时刻下的ESV(元); A_i 为土地利用/覆被类型*i*的面积(hm^2); VC_i 为ESV系数(元· hm^{-2})。

本文参考谢高地等构建的中国陆地单位面积ESV表,参考前人研究^[25]确定地区修正因子为0.58,同时依据2017年乌鲁木齐市农牧局提供的主要农作物播种面积和市场价格核算单位因子价值量,修正乌鲁木齐市单位面积ESV为2834.17元· hm^{-2} ,最终得到2017年乌鲁木齐市单位面积ESV系数表^[26](表2)。

2.2.2 景观生态安全评价
LES指数是衡量景观生态安全的重要指标,能够反映出一个区域内因自然或人类活动所引起的景观格局变化及对环境的影响^[27]。通过构建LES指数能够很好的评估该地区景观结构和功能,生态系统完整性、景观动态变化等,并对其景观生态安全的风险或安全做出准确的判断。考虑到研究区的地域特点,本文选择景观干扰度指数和景观脆弱度指数组成LES指数评价模型^[28]。

(1) 景观干扰度指数

景观干扰度指数(E_i)是衡量景观生态环境受自然及人类活动影响程度强弱的指数,通过景观指数中的破碎度、分离度和优势度加权求得。其计算公

表2 乌鲁木齐市陆地生态系统单位面积生态系统服务价值(ESV)系数

Tab. 2 Coefficient of ecosystem service value per unit area of terrestrial ecosystem in Urumqi City /元·hm⁻²

服务类型		建设用地	水体	耕地	林草地	裸地
一级类型	二级类型					
调节服务	气体调节	0.00	1538.54	1185.54	2877.25	0.00
	气候调节	0.00	4575.63	619.41	8152.21	0.00
	水文调节	0.00	299907.30	2923.59	7167.20	0.00
	净化环境	151.02	11089.40	179.83	2470.97	15.31
支持服务	土壤保持	0.00	162.89	60.72	307.08	30.80
	生物多样性保护	0.00	5095.13	226.55	3183.63	523.39
	营养物循环	0.00	139.86	206.47	266.41	0.00
供给服务	食物供应	143.73	1598.48	1471.93	459.56	15.31
	原材料	0.00	459.56	326.36	845.86	0.00
	水资源供给	452.91	24317.61	-2552.03	664.90	46.11
文化服务	娱乐文化	143.73	3776.39	99.91	1398.57	15.31
	总计	891.39	352660.80	4748.25	27793.64	646.24

式为:

$$E_i = aC_i + bS_i + cD_i \tag{7}$$

式中: E_i 为景观干扰度指数; C_i 为景观破碎度指数; S_i 为景观分离度指数; D_i 为景观优势度指数; a, b, c 分别为破碎度、分离度和优势度的权重, 参照前人研究^[29]和结合研究区实际情况, 分别对其赋值 0.5, 0.3, 0.2, 并做归一化处理。

景观破碎度 (C_i) 是评估景观生态环境极其组成要素受外界干扰导致破碎的程度。

$$C_i = \frac{N_i}{A_i} \tag{8}$$

式中: N_i 为斑块数目; A_i 表示 i 型景观面积。

景观分离度 (S_i) 是用来表示景观类型斑块离散程度的指数。

$$S_i = \frac{1}{2} \times \sqrt{\frac{N_i}{A}} \times \frac{A}{A_i} \tag{9}$$

式中: A 为景观总面积, 其他指代相同。

景观优势度 (D_i) 是描述景观在时空尺度变化的异质性和多样性的指标。

$$D_i = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \left(\frac{N_i}{N} + \frac{M_i}{M} \right) + \frac{1}{2} \times \frac{A_i}{A} \tag{10}$$

式中: N 为所有景观总数目; M_i 为第 i 型景观出现的样方数; M 为总样方数。其他指代相同。

(2) 景观脆弱度指数

景观脆弱度指数 (F_i) 是用来评估各类型景观抵御自然或人类活动干扰能力的指数。一般而言,

生态系统所处的阶段越初级, 其脆弱程度就越高。根据前人研究及研究区特征^[30], 对各类景观脆弱度赋值如下: 裸地为 5, 水体为 4, 耕地为 3, 林草地为 2, 建设用地为 1。由于各指数的量纲不同, 对各类景观赋值进行归一化处理。

(3) LES 指数

LES 指数能够反映该地区景观生态结构、功能、分布受自然或人类活动影响的程度^[31]。其计算公式为:

$$LES_k = \sum_i^m \frac{A_{ki}}{A_k} (1 - 10 \times E_i \times F_i) \tag{11}$$

式中: LES_k 为第 k 个单元 LES 指数; A_{ki} 为单元内景观类型 i 的面积; A_k 为评价单元面积。其他指代与之前相同。

2.2.3 PSR 模型评价

(1) PSR 指标体系及说明

目前, 有关生态安全评价的研究常以行政单元(省、市、县)作为评价单元, 此种方法获取数据相对便利。本文亦采取此种分割方式, 以乌鲁木齐市县级行政区域作为评价单元, 通过多源数据重采样, 反映该区域生态安全空间分异。

本文在参考前人研究的成果基础上^[32-33], 考虑到研究区自然背景, 依据指标选取的科学性、全面性、适用性和动态性等原则, 同时结合数据可获得性, 以研究区土地生态安全评价为总目标, 考虑到区域分异及不同因子的相关程度, 参考国内外研究

成果^[34-35],根据PSR模型结构,逐层次分解指标并划分为:目标层、准则层、要素层和指标层。重点选取与土地生态安全相关的指标,并引入ESV和LES指数共同构建评价体系(表3)。通过相关性分析筛选出相关性较大(相关系数>0.7)的指标,最终确定20项指标,并利用熵权法确定指标权重,能够体现各指标的区域分异,又可体现指标的数理特征。

(2) 指标定义与标准化

因为指标类型繁复且标准不一,难以直接对比,所以在指标评价标准方面,优先选择具有国际或国家标准的指标,依次是依据“十三五”规划的生态文明标准,先明确评价指标标准值,再依据标准化方法处理指标参数,对于无明确标准数值的指标,则按照指标正逆方向极差标准化处理,对评价指标赋值[0,1]间。部分指标无法量化的则进行量化分级赋值。部分指标含义及计算方式如下:

坡度:即高度差/水平距离,由DEM数据中提取而得,该指标为逆指标,坡度越大,则人类开发难度

越大。依照坡度对社会分工影响:[0°,5°]赋值为1,(5°,10°]赋值为0.8°,(10°,15°]赋值为0.6,(15°,25°]赋值为0.4,>25°赋值为0.2。

NDVI:从MODIS数据中获得,利用ArcGIS软件分区统计而得,该指标为正指标,其值越大,则植被覆盖越茂密,越有利于土地生态系统的稳固。

水网密度:即区域中河流长度/区域土地总面积,该指标为正指标,其值越大,则区域水资源越丰沛,有利于土地生态系统良序运转。

土壤质地:从全球土壤属性数据库中的中国土壤数据集中获得,该指标为正指标,土壤稳定性越强,则土地生态状态越稳定。依次按照壤质、砾质、黏质、砂质分别赋值0.7、0.5、0.3、0.1。

LES通过景观生态安全评价模型而得。该指标为正指标,LES指数越高,则景观生态结构功能越稳定,生态环境水平越高。

年均降水量:即一年内降水量之和。该指标为正指标,因乌鲁木齐市地处干旱区,降水量越多,则

表3 乌鲁木齐市土地生态安全评价指标体系标准及权重

Tab. 3 Evaluation index system standard and weight of land ecological security in Urumqi City

目标层	准则层	要素层	指标层	指标来源	指标权重	标准值		标准来源	指标方向
						安全值	不安全值		
乌鲁木齐市土地生态安全	压力	社会压力	人口密度/人·hm ⁻²	统计年鉴	0.023	-	-	极差标准化	-
			自然增长率/%	统计年鉴	0.027	-	-	极差标准化	-
			经济密度/10 ⁸ 元·km ⁻²	统计年鉴	0.051	-	-	极差标准化	+
	资源压力	资源压力	人均水资源量/m ³ ·人 ⁻¹	统计年鉴	0.075	-	1000	国家标准	+
			人均耕地面积/hm ² ·人 ⁻¹	统计年鉴	0.081	0.08	0.02	国家标准	+
	状态	地形条件	坡度/°	DEM数据	0.069	-	-	极差标准化	-
			植被条件	NDVI	专题数据	0.033	-	极差标准化	+
			森林覆盖率/%	专题数据	0.037	-	-	极差标准化	+
		水文条件	水网密度/km·km ⁻²	专题数据	0.024	-	-	极差标准化	+
			土壤条件	土壤质地	专题数据	0.019	-	极差标准化	+
		景观条件	LES	遥感数据	0.054	-	-	极差标准化	+
			降水	年均降水/mm	气象数据	0.061	800	国家标准	+
	响应	自然响应	ESV/10 ⁸ 元	遥感数据	0.074	-	-	极差标准化	+
			耕地面积比重/%	遥感数据	0.052	-	-	极差标准化	-
			耕地灌溉比率/%	统计年鉴	0.085	-	-	评分后赋值	+
		社会响应	路网密度/km·km ⁻²	专题数据	0.046	-	-	极差标准化	+
			人均GDP/10 ⁴ 元	统计年鉴	0.054	2.5	0.5	国家标准	+
			第三产业比重/%	统计年鉴	0.034	-	-	极差标准化	+
			城市化水平/%	统计年鉴	0.049	-	-	国家标准	+
			灯光密度	遥感数据	0.053	-	-	国家标准	+

注:“-”表示无标准数据;“+”为正向,“-”为负向。

区域内生态环境条件越乐观。

ESV:通过生态系统服务价值评估模型求得。该指标为正指标,ESV 越高,则土地生态系统功能结构越完整,潜能越大。

灯光密度:即区域内灯光像元总值,利用珞珈一号灯光数据统计而得。该指标为正指标,灯光密度越高,则人类经济活动强度越大,集约度越高,对外界资源吸引力越高。

2.2.4 土地生态安全综合评价模型 本文基于PSR模型框架,通过各指标加权求和构造土地生态安全指数,借助土地生态安全指数表征区域土地生态安全综合水平。

(1) 土地生态安全指数

土地生态安全指数(Ecological security index, ESI)是评估一个区域土地生态安全程度的重要方法,能够很好表征区域土地生态安全程度^[36],值域范围为[0,1]。ESI指数计算公式为:

$$ESI_k = \sum_i^n P_i \cdot W_i \tag{12}$$

式中: ESI_k 为第 k 个区县的土地生态安全指数; P_i 为第 i 个指标标准化后的值; W_i 为第 i 个指标的权重。

(2) 评价标准

生态安全指数能够客观评价一个区域的生态安全程度,在相关研究基础上,结合野外实地勘测,协调干旱区特殊生态环境特点,对生态安全指数进行修正划定,通过参考前人研究成果^[37-39]同时针对该地区生态安全评价依据生态安全指数高低,人为设置断点,将整个区域生态安全划分为 I 型危险级, II 型敏感级, III 型临界安全级, IV 型相对安全级, V 型安全级(表4)。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务价值(ESV)评估

基于2017年乌鲁木齐市土地利用现状与ESV系数(表1)测算各区域ESV(表5、图2),利用自然间断点法将ESV分布划分为高(20.57~35.27)、较高(8.02~20.56)、中等(2.16~8.01)、较低(0.80~2.15)、低(0.00~0.79)5类,单位为 10^7 元· hm^{-2} 。结果表明:2017年乌鲁木齐市ESV为 220.70×10^8 元,其中调节服务 175.08×10^8 元、支持服务 22.39×10^8 元、供给服务 15.87×10^8 元、文化服务 7.36×10^8 元。由图2a可知,乌鲁木齐市ESV整体水平不高,其中高ESV区

表4 乌鲁木齐市生态安全指数(ESI)评价分级表

Tab. 4 Evaluation and grading of ecological security index in Urumqi City

ESI 指数	安全等级	安全状态	状态说明
$0.00 \leq ESI \leq 0.20$	I	危险级	区域土地生态安全已破坏到难以恢复状态,生态环境不完整,功能缺失,难以满足生态系统发展需要。
$0.20 < ESI \leq 0.35$	II	敏感级	区域生态安全已遭到严重破坏,生态敏感性强,生态功能退化严重,生态压力较大。
$0.35 < ESI \leq 0.45$	III	临界安全级	生态安全受到一定影响,生态结构完整但存在一定生态异常现象,有一定生态压力。
$0.45 < ESI \leq 0.75$	IV	相对安全级	区域土地生态安全受自然及人类活动影响轻微,生态结构较为合理,整体生态系统较为健康,有轻微生态压力。
$0.75 < ESI \leq 1.00$	V	安全级	区域土地生态安全几乎未受影响,整体生态功能完善,生态结构完整,适宜区域生态系统可持续发展,无生态压力。

表5 2017年乌鲁木齐市区县生态系统服务价值(ESV)统计

Tab. 5 Statistical of ecosystem service value of districts and county in Urumqi in 2017

/10⁸元

服务类型	合计	天山区	沙依巴克区	高新区	水磨沟区	头屯河区	米东区	达坂城区	乌鲁木齐县
调节服务	175.08	4.23	2.79	3.79	3.09	23.60	3.51	62.85	71.21
支持服务	22.39	0.31	0.31	0.67	0.49	3.40	0.37	6.63	10.21
供给服务	15.87	0.36	0.18	0.36	0.32	2.16	0.31	5.67	6.50
文化服务	7.36	0.12	0.12	0.24	0.16	0.88	0.15	2.05	3.63
合计	220.70	5.03	3.40	5.06	4.07	30.06	4.34	77.20	91.54

chinaXiv:202104.00029v1

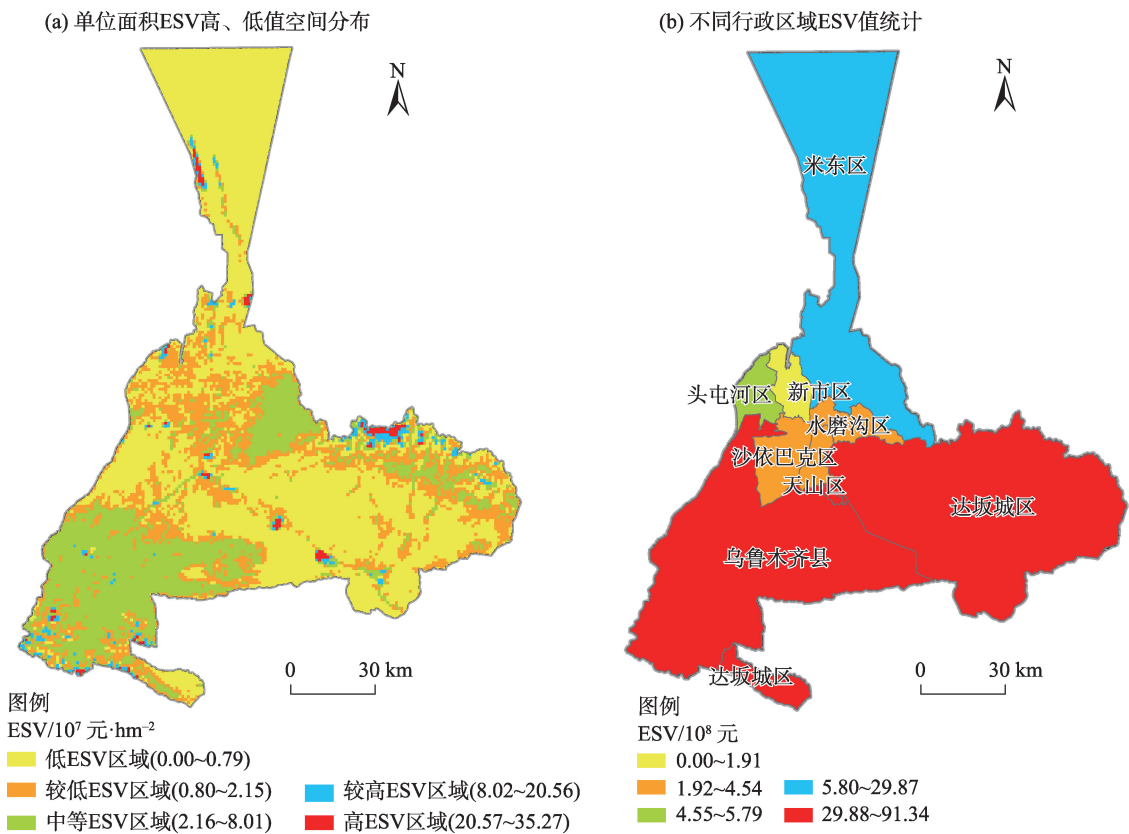


图2 乌鲁木齐市生态系统服务价值(ESV)空间分布统计
Fig. 2 Regional distribution of ecosystem service value in Urumqi City

域占比0.81%、较高ESV区域占比1.71%、中等ESV区域占比23.72%、较低ESV区域占比21.52%、低ESV区域占比52.24%，中低ESV区域占比极大，高ESV区域极少。乌鲁木齐市高ESV区域主要集中在博格达山、乌拉泊、米东区北部的冰川和水域，中等ESV区域则主要分布在南山林场和博格达山等植被覆盖茂密的区域，低ESV区域则广泛分布于城市及裸地，林草地是乌鲁木齐市ESV最主要的贡献者。分解到不同行政单元(图2b)，可以发现，各行政区ESV存在较大差别，乌鲁木齐县、达坂城区、头屯河区的ESV远高于其他区域，乌鲁木齐市主要建成区(高新区、水磨沟区、沙依巴克区、天山区)中以高新区ESV为最高，天山区与之接近，沙依巴克区与其他区域差距较大。

3.2 景观生态安全评价

本文在已有的相关研究基础上^[40]，结合研究区特点，运用景观指数计算软件FRAGSTATS 4.2计算本文所需景观格局指数。通过LES指数反映该地区景观分布状况，对该地区景观生态安全给予评价，并对最后构建综合生态安全格局做出重要参考。

3.2.1 景观格局分析 (1) 针对研究区土地利用类型结构，选取了斑块类型水平尺度指数：斑块面积(CA)、斑块数量(NP)、最大斑块占景观面积比例(LPI)、斑块形状指数(LSI)、斑块平均最近距离(ENN_MN)、斑块散布与并列指数(IJL)、斑块分离度指数(SPLIT)、斑块聚合度指数(AI)等8项指标(表6)。

由表6可知，研究区内裸地和林草地是占据优势的主要景观类型，面积占比达到56.57%和31.73%。斑块数量最多的是林草地，裸地和建设用地紧随其后。研究区内裸地LPI指数最高，说明连片裸地分布较为广泛。林草地的LSI指数远高于其他景观类型，说明林草地分布的形状最为复杂。水域的ENN_MN指数、IJL指数最高，说明同一景观之间斑块距离最远的是水域，其分布也最为分散。水域、耕地、建设用地的SPLIT指数远超其他区域，说明这3种景观类型相对更加紧凑，更容易区分。各景观类型的AI指数差异不明显，裸地相对集聚性较高。研究区具备典型的干旱区景观特征，景观整体的分布较为协调，但从景观类型来看，景观的生态

表6 乌鲁木齐市斑块类型水平尺度指数
Tab. 6 Horizontal scale index of patch type in Urumqi City

土地利用类型	CA/hm ²	NP	LPI/%	LSI	ENN_MN	IJL	SPLIT	AI
裸地	778378.86	21237.00	27.03	104.85	124.20	57.12	10.31	96.47
建设用地	76228.74	21599.00	0.76	167.08	157.01	77.72	10677.22	81.93
水域	25889.76	4267.00	0.32	57.62	275.53	83.11	64886.64	89.42
林草地	436582.53	27098.00	16.85	170.34	111.95	74.75	32.29	92.31
耕地	58977.45	14435.00	0.48	119.61	180.66	51.67	25097.90	85.32

注:CA为斑块面积;NP为斑块数量;LPI为最大斑块占景观面积比例;LSI为斑块形状指数;ENN_MN为斑块平均最近距离;IJL为斑块散布与并列指数;SPLIT为斑块分离度指数;AI为斑块聚合度指数。下同。

优势不突出,条件相对恶劣。

(2) 基于研究区景观空间结构,选取景观类型水平指数:斑块数量(NP)、周长面积分维数(PAFRAC)、蔓延度指数(CONTAG)、散布与并列指数(IJL)、结合度指数(COHESION)、斑块分离度指数(SPLIT)、香农均匀度性指数(SHEI)、香农多样性(SHDI)等8项指标(表7)。

由表7可知,研究区内斑块数量最多的是达坂城区,其次为乌鲁木齐县。各区域的PAFRAC指数均接近1,说明各区域景观形状分布规律。达坂城区、米东区、乌鲁木齐县CONTAG指数远高于其他区域,说明此区域内景观优势斑块类型形成了较好的连接。各区域IJL指数差异不大,米东区最大,说明各区域景观分布相对均匀,米东区较差。各区域COHESION指数相近,SPLIT指数存在较大差异,尤其是头屯河区和高新区远高于其他区域,说明该区域景观结构清晰,单一景观聚合程度较高。各区域香农均匀性指数差异较小,说明区域景观的整体分布相对平均,且优势景观不明显,建成区香农多样

性指数则普遍高于其他区域。乌鲁木齐市的景观特征存在以下特点:人类活动聚集的区域(中心4区)与其他区域存在较大差别,中心区域与边缘区域内部差异不明显,整体相对协调,景观团聚度适当,但总体水平不高。

3.2.2 LES指数 依托部分景观格局指数,基于公式(7)~(11)测算该区域综合LES指数分布(表8)。

结果表明:(1) 乌鲁木齐市LES指数分布表现为“西低东高”,高值区主要集中在达坂城区、乌鲁木齐县和米东区的部分区域,乌鲁木齐市主要建成区的LES指数普遍偏低(图3a)。(2) 由表8、图3b可知,乌鲁木齐市各区域LES指数表现出一定的分类组团特征。由景观脆弱度指数方向发现,各区域在抵御自然或人类活动干扰的能力差异较大,可分为3类,其中达坂城区最高达到0.39,乌鲁木齐县和米东区较为接近为0.25和0.28,其他区域集聚在低值区域。由景观干扰度指数方向发现,各区域在受外部影响的强弱上可分为四类,其中达坂城区最高为1.63、乌鲁木齐县和米东区略低为1.40、头屯河区和

表7 乌鲁木齐市景观类型水平尺度指数
Tab. 7 Horizontal scale index of landscape type in Urumqi City

地区	NP	PAFRAC	CONTAG	IJL	COHESION	SPLIT	SHEI	SHDI
乌鲁木齐市	88636.00	1.35	58.45	69.81	99.79	7.81	0.66	1.06
达坂城区	24672.00	1.34	67.08	52.26	99.85	2.68	0.81	0.50
高新区	5584.00	1.37	38.36	68.58	98.19	23.92	1.36	0.84
米东区	18567.00	1.36	65.99	76.19	99.47	2.64	0.88	0.55
水磨沟区	3636.00	1.36	53.73	69.43	99.06	5.57	1.06	0.66
沙依巴克区	5635.00	1.37	46.62	70.13	98.67	12.71	1.24	0.77
天山区	2752.00	1.34	42.24	73.22	98.75	9.88	1.34	0.84
头屯河区	4622.00	1.35	40.15	75.54	98.21	26.15	1.38	0.86
乌鲁木齐县	24361.00	1.33	62.01	63.15	99.87	3.09	0.97	0.60

注:PAFRAC为周长面积分维数;CONTAG为蔓延度指数;COHESION为结合度指数;SHEI为香农均匀度性指数;SHDI为香农多样性。

chinaXiv:202104.00029v1

表 8 乌鲁木齐市景观生态安全指数(LES)及其分解

Tab. 8 Landscape ecological security index and its decomposition in Urumqi City

地区	景观干扰度指数	景观脆弱度指数	LES 指数
达坂城区	1.63	0.39	0.69
米东区	1.40	0.28	0.48
沙依巴克区	0.30	0.03	0.22
水磨沟区	0.32	0.01	0.16
天山区	0.31	0.01	0.11
头屯河区	1.03	0.02	0.20
乌鲁木齐县	1.40	0.25	0.59
高新区	1.01	0.01	0.12

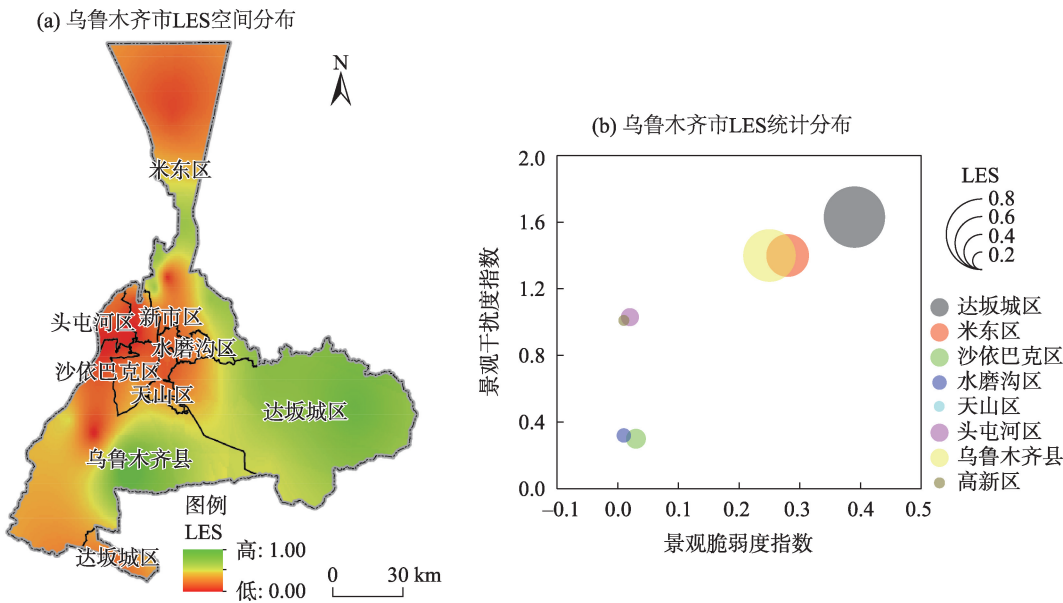


图 3 乌鲁木齐市景观生态安全指数(LES)分异

Fig. 3 Distribution map of Landscape ecological security index in Urumqi City

高新区较为接近,其他区域较低。各区域的LES指数存在显著差别,达坂城区、乌鲁木齐县、米东区与其他区域相差巨大。综合来看,乌鲁木齐市LES指数受到人类活动的深刻影响,人类活动密集区域的景观条件普遍恶劣。

3.3 综合生态安全评价

在上述研究的基础上,依托土地生态安全综合评价模型,对乌鲁木齐市土地生态安全进行评价,可以获悉乌鲁木齐市土地生态安全的综合表征(图4)。

由图4a可知:(1)压力模块中压力值最高的是米东区,为0.19,最低的是天山区和沙依巴克区,压力值为0.06,除米东区外,各区域差异不明显。压力模块主要反映人类活动的胁迫作用,米东区作为乌鲁木齐市城区扩张的方向区域之一,近年来,吸纳

了大量人口定居,同时作为乌鲁木齐市传统的粮食保育区,城市在扩张过程中,建设用地侵占耕地,人均水资源消耗增大等都在一定程度上削弱了该区域的生态恢复能力,造成了米东区成为乌鲁木齐市受人类活动影响最为突出的区域,天山区和沙依巴克区是乌鲁木齐市人类活动最为密集和持久的区域,但其自然本底薄弱,因此人类活动的影响便相对不够明显。(2)状态模块中,状态值最高的是乌鲁木齐县,为0.25,水磨沟区和达坂城区的状态值也较高,分别达到0.20和0.18,状态值最低的是米东区和高新区,状态值为0.09。乌鲁木齐县是乌鲁木齐市自然禀赋最为优良的区域,其境内分布有大量的林草地和水系,同时由于地处边缘,人类活动的足迹相对较少,受人类活动的影响不够强烈。水磨沟区

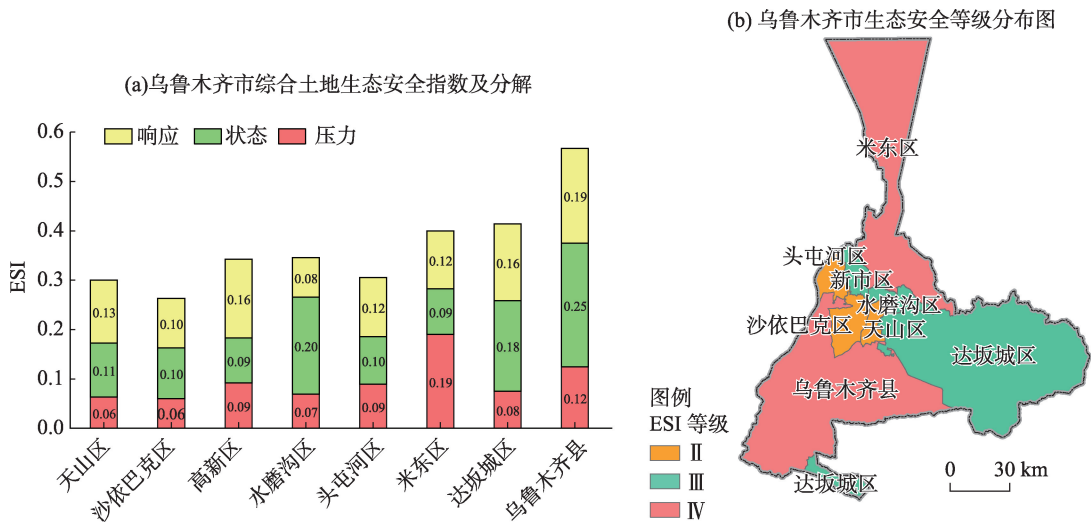


图4 乌鲁木齐市土地生态安全指数(ESI)
Fig. 4 Land ecological security index in Urumqi City

和达坂城区的自然本底相对其他区域也较为优良,景观多样,高新区是乌鲁木齐市发展的核心区域,其境内多以建设用地为主,因此自然禀赋相对薄弱,米东区北部是古尔班通古特沙漠的衍生部分,同时该区域是传统的农业垦区,近年来又成为产业转移和人口安置的主要区域,因此自然禀赋受到削弱。(3) 响应模块中,乌鲁木齐县的响应值最高,达到0.19,水磨沟区最低为0.08。响应模块对应人类对生态系统的改善作用,从各项分解指标来看,各区域差异不明显。(4) 乌鲁木齐县、米东区、达坂城区,远离人类活动的主要范围,又具有较为优良的自然禀赋,因此其综合土地生态安全指征要明显高于中心城区,中心城区受制于人类活动的深刻影响,土地生态系统遭到了一定程度的破坏,其土地生态安全指征也处于较低水平。

最终,基于土地生态安全评价模型,利用公式(9)计算得到2017年乌鲁木齐市生态安全指数,运用ArcGIS软件根据ESI等级绘制出乌鲁木齐市各区县ESI空间状况(图4b)。就2017年乌鲁木齐市各区县ESI水平而言,乌鲁木齐市整体生态安全程度维持在中等水平。其中,乌鲁木齐县、米东区生态安全水平处于相对安全区域,达坂城区、高新区、天山区、水磨沟区处于临界安全区域,头屯河区、沙依巴克区位于敏感级区域。

4 结论与讨论

本研究借助PSR模型框架对2017年乌鲁木齐

市土地生态安全给予评价,同时引入ESV和LES指数参与构建评价体系,在此基础上得出以下结论:

(1) 2017年乌鲁木齐市ESV为 220.70×10^8 元,97.48%的区域为中低ESV区域,ESV最重要的贡献来源是林草地,最主要的贡献区域是乌鲁木齐县和达坂城区,不同区域ESV差异明显。

(2) 乌鲁木齐市具备典型的干旱区城市景观特征,景观整体分布相对协调,但具备生态优势的景观分布还较少。LES指数从空间上表现为“西低东高”,且总体水平偏低,同时各区域的LES指数还有一定的分类组团特征,高值区域集中在达坂城区、乌鲁木齐县、米东区等边缘区域,中心城区的LES指数普遍较差,受人类活动影响深刻。

(3) 基于PSR评价框架,可以发现乌鲁木齐市各区域土地生态安全主要分布在敏感级和相对安全级之间,整体处于中等水平,边缘区域普遍高于中心区域。分解到PSR模型的不同模块可以发现,乌鲁木齐市土地生态安全受人类活动影响极为深刻,随着城市扩张和人口增长,土地侵占、资源消耗等矛盾加剧,部分区域的土地生态安全已经受到一定程度的破坏,能够维持现有水平,主要凭借乌鲁木齐市各区域的自然本底(状态),人类活动的恶劣影响(压力)和积极改善作用(响应)尚不明显。

土地生态安全水平能够有效表征区域内人类活动的侧重方向,对未来土地利用规划及城市开发具有较强的指导作用,土地生态安全水平与区域可持续发展相辅相成,其水平越高,则对区域可持续

发展的支撑作用就越强,因此要特别重视。从结果来看,目前乌鲁木齐市的土地生态安全水平还存在较大改善空间,土地生态安全水平较低的区域还集中在人类活动频繁的区域,未利用地在研究区占据了较大比例,荒漠化情况还很严峻,林草地和水域是维护该区域土地生态安全水平的重要用地类型,但其景观条件较为恶劣。在未来发展中,要注重对研究区内土地利用和环境保护规划,特别是林草地和水域的保护。同时,为避免土地生态安全水平继续恶化,应建立长效的土地生态环境动态监督机制,增强对土地开发的管控。

本研究与前人相关^[41-42]评价结果基本一致,方法有效、可行。但本研究从生态系统服务视角和景观生态学视角,刻画了生态安全的空间分布,在一定程度上规避了传统评价方法过度依赖于社会经济统计资料而忽视土地利用及其自然分布的问题,丰富了传统评价方法的内涵,同时综合评价体系相比于传统的评价方法减少了主观定量过程,综合了自然、社会、经济多种因素,提升了评价的可信度。

土地生态安全评价是一项复杂的系统工程,评价过程极易受到各种指标的干扰,本研究尝试糅合多种视角,通过筛选代表性指标等方法,尽可能使评价结果科学可靠,但受限于数据获取难度和完整性,评价结果还有较大提升空间。同时本文仅针对乌鲁木齐市2017年土地生态安全现状进行分析,未能表现乌鲁木齐市土地生态安全水平的时序变化,笔者将在后续的研究中加以完善和补充。

参考文献 (References)

- [1] 张利,陈影,王树涛,等. 滨海快速城市化地区土地生态安全评价与预警——以曹妃甸新区为例[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2445-2454. [Zhang Li, Chen Ying, Wang Shutao, et al. Assessment and early warning of land ecological security in rapidly urbanizing coastal area: A case study of Caofeidian new district, Hebei, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(8): 2445-2454.]
- [2] 李明月,赖笑娟. 基于BP神经网络方法的城市土地生态安全评价——以广州市为例[J]. 经济地理, 2011, 31(2): 289-293. [Li Mingyue, Lai Xiaojuan. Evaluation on ecological security of urban land based on BP neural network: A case study of Guangzhou[J]. Economic Geography, 2011, 31(2): 289-293.]
- [3] 张小虎,雷国平,袁磊,等. 黑龙江省土地生态安全评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2009, 19(1): 88-93. [Zhang Xiaohu, Lei Guoping, Yuan Lei, et al. Evaluation on ecological security of land based on entropy weight and matter-element model: A case study of Heilongjiang Province[J]. China Population, Resources and Environment, 2009, 19(1): 88-93.]
- [4] 刘时栋,徐丽萍,张婕. 新疆土地生态安全时空变化[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 3871-3884. [Liu Shidong, Xu Liping, Zhang Jie. Spatiotemporal change of land ecological security in Xinjiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(11): 3871-3884.]
- [5] 马轩凯,高敏华. 西北干旱地区绿洲城市土地生态安全动态评价——以新疆库尔勒市为例[J]. 干旱区地理, 2017, 40(1): 172-180. [Ma Xuankai, Gao Minhua. Dynamic evaluation of land ecological security in oasis cities in northwest arid areas: Taking Korla City, Xinjiang as an example[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(1): 172-180.]
- [6] 熊建华,唐将伟. 广州市土地生态安全与社会经济发展耦合协调研究[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(2): 615-620. [Xiong Jianhua, Tang Jiangwei. On the coupling harmonic coordination between the land ecological security and the social economic development: A case sampling study of Guangzhou[J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(2): 615-620.]
- [7] 于潇,吕春艳,郭旭东,等. 京津冀城市群地区土地生态状况评估[J]. 中国土地科学, 2018, 32(4): 89-96. [Yu Xiao, Lyu Chunyan, Guo Xudong, et al. Assessment on the status of land ecosystem in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. China Land Science, 2018, 32(4): 89-96.]
- [8] 窦学诚,付滨. 基于PSR模型的河西制种基地耕地生态安全物元分析评价[J]. 西南农业学报, 2018, 31(9): 1919-1926. [Dou Xuecheng, Fu Bin. Analysis and evaluation of Hexi seed production base of cultivated land ecological security element based on PSR model[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018, 31(9): 1919-1926.]
- [9] 卢晓宁,洪佳,王玲玲. 洪泽湖湿地地区土地生态安全评价[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37(3): 145-150. [Lu Xiaoning, Hong Jia, Wang Lingling. Evaluation of land ecological security in Hongze Lake Wetland[J]. Journal of Southwest University(Natural Science Edition), 2015, 37(3): 145-150.]
- [10] 马世五,谢德体,张孝成,等. 三峡库区生态敏感区土地生态安全预警测度与时空演变——以重庆市万州区为例[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8227-8240. [Ma Shiwu, Xie Deti, Zhang Xiaocheng, et al. Measures of land ecological security early warning and its spatial-temporal evolution in the ecologically sensitive area of the Three Gorges reservoir area: A case study of Wanzhou District, Chongqing City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(24): 8227-8240.]
- [11] 周迎雪,李贻学,孙仪阳,等. 基于PSR-TOPSIS模型的山东省土地生态安全评价[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(4): 320-326. [Zhou Yingxue, Li Yixue, Sun Yiyang, et al. Evaluation of land ecological security in Shandong Province based on PSR-TOPSIS

- model[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(4): 320–326.]
- [12] 田丰收, 刘新平, 原伟鹏. 新疆和田地区耕地地面源污染生态风险评估[J]. *干旱区地理*, 2019, 42(2): 295–304. [Tian Fengshou, Liu Xinping, Yuan Weipeng. Ecological risk assessment of cultivated ground source pollution in Hotan Region of Xinjiang[J]. *Arid Land Geography*, 2019, 42(2): 295–304.]
- [13] 陈伊多, 杨庆媛, 杨人豪, 等. 基于熵权物元模型的土地生态安全评价——重庆市江津区实证[J]. *干旱区地理*, 2018, 41(1): 185–194. [Chen Yiduo, Yang Qingyuan, Yang Renhao, et al. Evaluation of land ecological security based on entropy weight matter-element model: An empirical study of Jiangjin District in Chongqing[J]. *Arid Land Geography*, 2018, 41(1): 185–194.]
- [14] 彭云飞, 杨芳玲, 任福, 等. 大都市区土地利用与土地生态安全关系的计量分析——以深圳市为例[J]. *国土与自然资源研究*, 2019(1): 6–10. [Peng Yunfei, Yang Fangling, Ren Fu, et al. Quantitative analysis of the relationship between land use and land ecological security in metropolitan areas: A case study of Shenzhen City[J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2019(1): 6–10.]
- [15] 于海洋, 张飞, 曹雷, 等. 基于乡镇尺度的土地生态安全时空格局评价研究——以博尔塔拉蒙古自治州为例[J]. *生态学报*, 2017, 37(19): 6355–6369. [Yu Haiyang, Zhang Fei, Cao Lei, et al. Spatial-temporal pattern of land ecological security at a township scale in the Bortala Mongolian Autonomous Prefecture[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(19): 6355–6369.]
- [16] 赵领娣, 李莎莎, 赵志博, 等. 干旱半干旱区城市生态效率时空演变及区域差异分析[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(2): 449–457. [Zhao Lingdi, Li Shasha, Zhao Zhibo, et al. Spatio-temporal evolution and regional differences of urban ecological efficiency in arid and semi-arid areas[J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(2): 449–457.]
- [17] Zhang P, Deng M, Long A, et al. Coupling analysis of social-economic water consumption and its effects on the arid environments in Xinjiang of China based on the water and ecological footprints [J]. *Journal of Arid Land*, 2020, 12(1): 73–89.
- [18] Zhou K, Liu Y, Tan R, et al. Urban dynamics, landscape ecological security, and policy implications: A case study from the Wuhan area of central China[J]. *Cities*, 2014, 41: 141–153.
- [19] 何珍珍, 王宏卫, 杨胜天, 等. 渭干河—库车河绿洲景观生态安全时空分异及格局优化[J]. *生态学报*, 2019, 39(15): 5473–5482. [He Zhenzhen, Wang Hongwei, Yang Shengtian, et al. Spatial-temporal differentiation and pattern optimization of landscape ecological security in the Ugan-Kuqa River oasis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(15): 5473–5482.]
- [20] 张崇森, 李森, 张力喆, 等. 基于PSR模型的城市生态安全评价与贡献度研究——以铜川市为例[J]. *安全与环境学报*, 2019, 19(3): 1049–1056. [Zhang Chongmiao, Li Sen, Zhang Lizhe, et al. Urban ecological security evaluation and contribution analysis by PSR model: A case study of Tongchuan City, Shaanxi[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2019, 19(3): 1049–1056.]
- [21] 刘志有, 徐馨怡, 李慧, 等. 西部干旱绿洲区城市土地生态风险预警及管控研究——以新疆乌鲁木齐市为例[J]. *国土资源科技管理*, 2018, 35(1): 11–21. [Liu Zhiyou, Xu Xinyi, Li Hui, et al. On early warning and control of urban land ecological risk of oasis in western arid region: A case study of Urumqi City of Xinjiang[J]. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 2018, 35(1): 11–21.]
- [22] 布美热木·克力木, 张凯, 朱平, 等. 熵权法在城市经济与环境耦合协调发展评价中的应用[J]. *环境科学导刊*, 2019, 38(5): 79–84. [Bumayram Kirem, Zhang Kai, Zhu Ping, et al. Application of entropy weight method to evaluate coordinated development of urban economy and environment[J]. *Environmental Science Survey*, 2019, 38(5): 79–84.]
- [23] 凡宸, 夏北成, 秦建桥. 基于RS和GIS的县域生态环境质量综合评价模型——以惠东县为例[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(3): 719–725. [Fan Chen, Xia Beicheng, Qin Jianqiao. An integrated assessment model of county level eco-environmental quality based on RS and GIS: A case study of Huidong County, Guangdong Province of south China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(3): 719–725.]
- [24] Robert Costanza. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387: 253–260.
- [25] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911–919. [Xie Gaodi, Zhen Lin, Lu Chunxia, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5): 911–919.]
- [26] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 等. 我国粮食生产的生态服务价值研究[J]. *中国生态农业学报*, 2005, 13(3): 10–13. [Xie Gaodi, Xiao Yu, Zhen Lin, et al. Study on ecosystem services value of food production in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(3): 10–13.]
- [27] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243–1254. [Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243–1254.]
- [28] 李秀珍, 布仁仓, 常禹, 等. 景观格局指标对不同景观格局的反应[J]. *生态学报*, 2004, 24(1): 123–134. [Li Xiuzhen, Bu Rencang, Chang Yu, et al. The response of landscape metrics against pattern scenarios[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1): 123–134.]
- [29] 何珍珍. 基于景观格局的塔里木盆地北缘绿洲生态安全研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2018. [He Zhenzhen. Based on the landscape pattern of northern Tarim Basin oasis ecology security studies[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2018.]
- [30] 张月, 张飞, 王娟, 等. 近40年艾比湖湿地自然保护区生态干扰

- 度时空动态及景观格局变化[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7082–7097. [Zhang Yue, Zhang Fei, Wang Juan, et al. Analysis of the temporal and spatial dynamics of landscape patterns and hemeroby index of the Ebinur Lake Wetland Nature Reserve, Xinjiang, over the last 40 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7082–7097.]
- [31] 李青圃, 张正栋, 万露文, 等. 基于景观生态风险评价的宁江流域景观格局优化[J]. 地理学报, 2019, 74(7): 1420–1437. [Li Qingpu, Zhang Zhengdong, Wan Luwen, et al. Landscape pattern optimization in Ningjiang River Basin based on landscape ecological risk assessment[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(7): 1420–1437.]
- [32] 马彩虹, 任志远, 李小燕. 黄土台塬区土地利用转移流及空间集聚特征分析[J]. 地理学报, 2013, 68(2): 257–267. [Ma Caihong, Ren Zhiyuan, Li Xiaoyan. Land use change flow and its spatial agglomeration in the Loess platform region[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(2): 257–267.]
- [33] 蒙古军, 赵春红, 刘明达. 基于土地利用变化的区域生态安全评价——以鄂尔多斯市为例[J]. 自然资源学报, 2011, 26(4): 578–590. [Meng Jijun, Zhao Chunhong, Liu Mingda. Regional ecological security assessment based on land-use change: A case study in Ordos City[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(4): 578–590.]
- [34] Ye Hua. Land ecological security assessment for bai autonomous prefecture of Dali based using PSR model: With data in 2009 as case[J]. Energy Procedia, 2011, 5(22): 2172–2177.
- [35] Han B L, Liu H X, Wang R S. Urban ecological security assessment for cities in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region based on fuzzy and entropy methods[J]. Ecological Modelling, 2015, 318: 217–225.
- [36] 谢余初, 巩杰, 张玲玲. 基于PSR模型的白龙江流域景观生态安全时空变化[J]. 地理科学, 2015, 35(6): 790–797. [Xie Yuchu, Gong Jie, Zhang Lingling. Dynamics of landscape ecological security based on PSR model in the Bailongjiang River Watershed[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(6): 790–797.]
- [37] 王涛, 张超, 于晓童, 等. 洱海流域土地利用变化及其对景观生态风险的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(7): 2003–2009. [Wang Tao, Zhang Chao, Yu Xiaotong, et al. Effect of land use change on landscape ecological security in Erhai Basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(7): 2003–2009.]
- [38] 于海洋, 张飞, 曹雷. 精河县土地利用/覆被变化及土地生态安全研究[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6): 348–353. [Yu Haiyang, Zhang Fei, Cao Lei. Research of land use/cover change and land ecological security in Jinghe County[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(6): 348–353.]
- [39] Xu Linyu. Land ecological security evaluation of Guangzhou, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public, 2014, 11(10): 10537–10558.
- [40] 韩逸, 郭熙, 江叶枫, 等. 南方丘陵区耕地景观生态安全影响因素及其空间差异[J]. 生态学报, 2019, 39(17): 6522–6533. [Han Yi, Guo Xi, Jiang Yefeng, et al. Cultivated land landscape ecological security: Influencing factors and spatial differences in the hilly region of south China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): 6522–6533.]
- [41] 朱亚楠, 闫志明, 蒲春玲, 等. 乌鲁木齐市土地利用/覆被变化及生态安全评价[J]. 林业资源管理, 2020(1): 79–91. [Zhu Yanan, Yan Zhiming, Pu Chunling, et al. Land use/cover change and ecological safety assessment in Urumqi[J]. Forest Resources Management, 2020(1): 79–91.]
- [42] 朱亚楠, 蒲春玲. 乌鲁木齐市土地利用景观格局变化及生态安全分析[J]. 生态科学, 2020, 39(2): 133–144. [Zhu Yanan, Pu Chunling. Analysis on landscape pattern change and ecological security of land use in Urumqi[J]. Ecological Science, 2020, 39(2): 133–144.]

Comprehensive ecological security assessment: A case study of Urumqi City

WANG Yishan^{1,2}, ZHANG Fei^{1,2,3}, CHEN Rui^{1,2}, QI Yaxiao^{1,2}, LIU Changjiang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Smart City and Environment Modeling, Resources and Environmental Science College, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China; 2. Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China; 3. Engineering Research Center of Central Asia Geoinformation Development and Utilization, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: For this study, we select the city of Urumqi, which is located in an arid region of China, as the research area and take 2017 as the time node. Then, we select 20 indicators in three aspects of nature, society, and economy to comprehensively characterize the level of LES in Urumqi. Combined with ecosystem services and landscape perspectives, spatial characteristics are described. The results show the following: (1) In 2017, the ESV in Urumqi was 22.07 billion yuan and 97.48% of its area was in the low-to-medium ESV domain. The most important source of ESV contribution were forest-grasslands, and the main contributing area was Urumqi County and Dabancheng District. Obvious differences were observed in the regional ESVs. (2) Urumqi has urban landscape characteristics that are typical of arid areas, and the overall distribution of its landscape is relatively coordinated. However, the landscape distribution having ecological advantages is currently small. The LES is spatially expressed as “west low and east high”, and the overall level is relatively low. Meanwhile, the LESs in various regions exhibit certain classification features. High-value areas are concentrated in edge areas such as Dabancheng District, Urumqi County, and Midong District. In the marginal areas, the LES in the central urban area is generally poor and is deeply affected by human activities. (3) The land ecological security of the various regions of Urumqi City is mainly distributed between the sensitive and relative security levels. Overall ecological security of the city is at a medium level; the edge areas generally exhibited a higher level of ecological security than that exhibited by the central areas. Urumqi County has the highest land ecological security level in the edge area, and high-tech zones have the highest level of land ecological security. With urban expansion and population growth, land encroachment and resource consumption and other similar parameters have intensified. Moreover, the land ecological security in some regions has been destroyed to a certain extent; and it can maintain the current level mainly relying on the natural background (state) of each region in Urumqi. The adverse effects (stress) and positive improvement (response) of human activities are not yet obvious. At present, there is much room for improving the level of land ecological security in Urumqi. Areas with low levels of land ecological security are still concentrated in areas with frequent human activities. Unused land occupies a large proportion in the study area. The desertification situation of Urumqi is still very serious. Forest-grasslands and land covered by water are important to maintain the ecological safety of the land in this area. However, the landscape conditions are relatively poor. In the future, we must pay attention to the land use and environmental protection planning in the study area, especially the protection of forest-grassland and land covered by water. Simultaneously, to avoid the continued deterioration of the land ecological security level, a long-term dynamic monitoring mechanism for the land ecological environment should be established to strengthen the control of land development.

Key words: PSR model; ecosystem service value; landscape ecological security; land ecological security assessment; Urumqi City